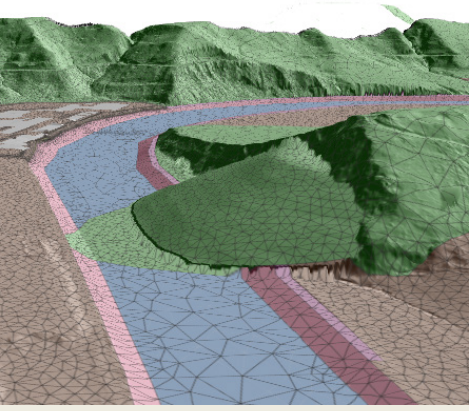


Extremhochwasser an der Aare

Resultatmappe 2 Projekt EXAR

Analysestandorte und Schlüsselstellen im Gesamtsystem

Subsystem SSB, Aare, Halen - Golaten & Saane, Gümmenenbrücke - Golaten

Fotos Umschlag

1. Stauanlage Mühleberg, Mühleberg. Foto: IUB Engineering AG, Begehung vom 5. April 2017.
2. Mündungsbereich Hagneckkanal in Bielersee. Foto: IUB Engineering AG, Begehung vom 10. April 2017.
3. Höhenmodell der Rutschung Brättele, nahe des Beurteilungsperimeters Mühleberg. Quelle: GEOTEST AG, 2020.
4. Wasser- und Kernkraftwerk bei Beznau. Foto: Schweizer Luftwaffe 2005, © VBZ.
5. Verklausung der Mattenschwelle bei Bern während des Hochwassers im August 2005. Foto: Schweizer Luftwaffe 2005, © VBZ.

Impressum

Datum: 26.02.2020

Herausgeber

ARGE GEOTEST-HZP-IUB, c/o GEOTEST AG, Bernstrasse 165, CH-3052 Zollikofen

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS)

Projektleitung

Severin Schwab (GEOTEST AG, SPOC AP3 & AP4), Roni Hunziker (Hunziker, Zarn & Partner AG, AP3), Michael Müller (IUB Engineering AG, AP4)

Experten/innen EXAR-Projekt

Helmut Habersack, BOKU Wien
Douglas Maraun, Universität Graz
Christian Pfister, em. Universität Bern
Bettina Schaefli, Universität Lausanne, Universität Bern
Anton Schleiss, em. École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL
Bruno Sudret, ETH Zürich

Redaktion

Patrick Baer, Andreas Sutter; GEOTEST AG
Sebastian Jaberg, Matthias Pfäffli; Hunziker, Zarn & Partner AG
Tobias Karrer, Michael Müller; IUB Engineering AG

Autoren und Mitarbeit

GEOTEST AG	Patrick Baer, Kaspar Graf, Alexandre Loye, Lorenz Moser, Annik Raissig, Severin Schwab, Andreas Sutter
HZP	Roni Hunziker, Andrea Irniger, Sebastian Jaberg, Matthias Pfäffli
IUB Engineering AG	Benjamin Auf der Maur, Peter Billeter, Renato Hemund, Tobias Karrer, Andrin Kasper, Luzia Meier, Georg Möller, Michael Müller

Zitiervorschlag

ARGE GEOTEST-HZP-IUB 2020: Extremhochwasser an der Aare. Resultatmappe 2 Projekt EXAR. Analysestandorte und Schlüsselstellen im Gesamtsystem, Subsystem SSB, Aare, Halen - Golaten & Saane, Gümmenenbrücke - Golaten. Zollikofen, Aarau, Bern: 20 S.

Hinweis

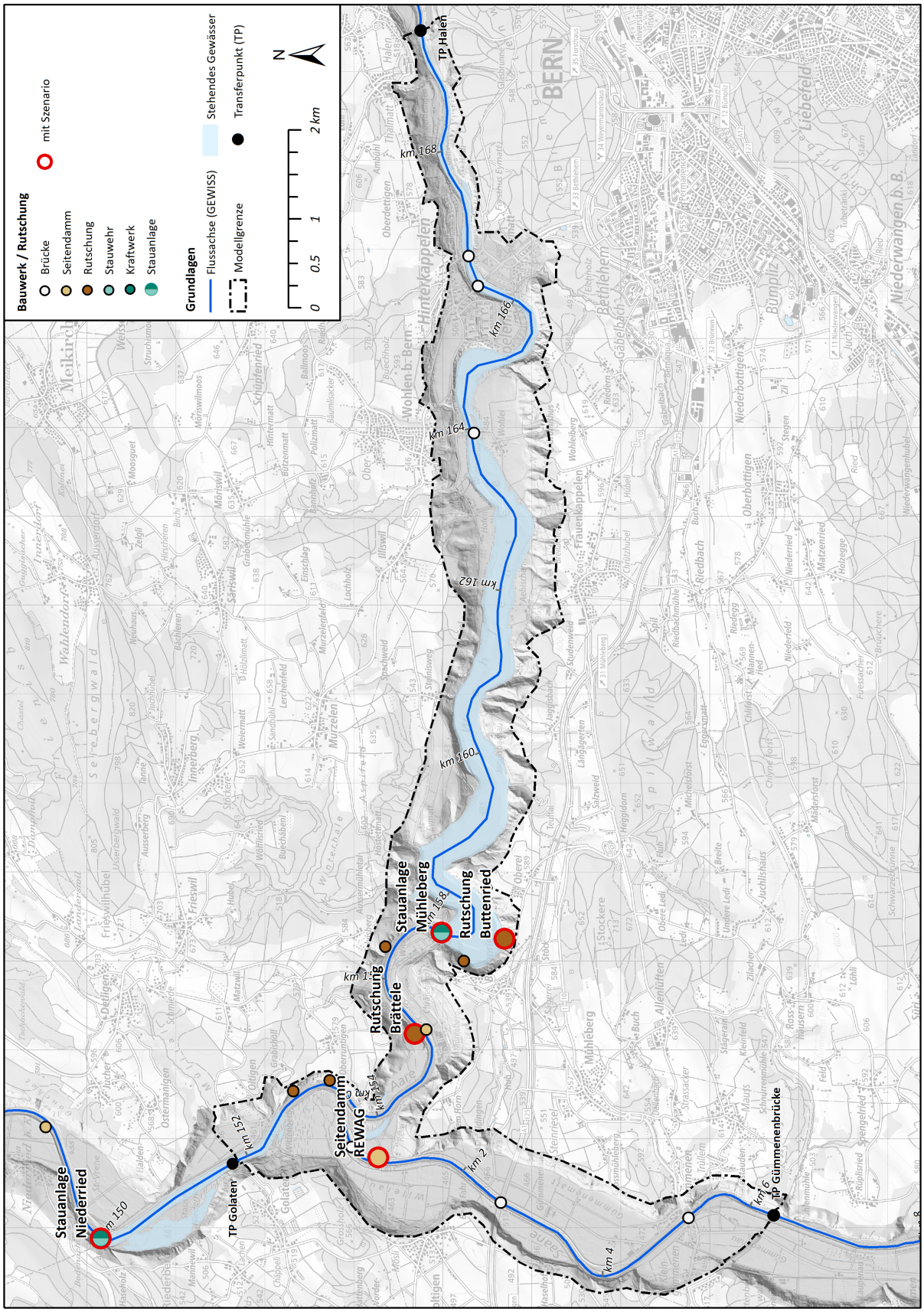
Dieser Bericht wurde im Auftrag der Bundesämter BAFU, ENSI, BFE, MeteoSchweiz und BABS verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

Subsystem SSB 5
1. Übersichtskarte 5
2. Untersuchte Szenarien und Prozessketten 6
3. Hydrologische Szenarien – Synthetische Ganglinien 8
4. Resultate der Analysestandorte 8
I. Rutschung Buttenried 9
I.1 Rutschung 9
II. Stauanlage Mühleberg 11
II.1 HW-Entlastung ausser Betrieb (n-n) 11
II.2 Partieller Bruch (Gewichtsmauer) 13
II.3 Vollständiger Bruch (Gewichtsmauer & Maschinenhaus) 15
III. Rutschung Brättele 17
III.1 Rutschung 17
IV. Seitendamm REWAG 19
IV.1 Breschenbildung / Ausbruch rechtsufrig 19

Subsystem SSB

1. Übersichtskarte



Übersicht der Analysestandorte im Subsystem B. Subsystemrelevante Analysestandorte mit einem kritischen Szenario hinsichtlich der Ausscheidung als Schlüsselstelle sind rot umkreist.

2. Untersuchte Szenarien und Prozessketten

Die Versagensszenarien wurden in der Schlüsselstellenanalyse hinsichtlich eines besseren Systemverständnisses und der Ausscheidung der Schlüsselstellen (Key Sites) gewählt. Dazu erfolgte in einem ersten Schritt die Analyse der Resultate aus den Nullläufen sowie aus der geologischen Einschätzung bzgl. grosser Massenbewegungen. Eine Übersicht der ermittelten, kritischen Szenarien der entsprechenden Analysestandorte findet sich in der Übersichtskarte (vgl. Kap. 1) und in der untenstehenden Tabelle. In der Tabelle ist zudem die Resultatblatt Nr. ersichtlich, die auf die detaillierten Resultate in Kapitel 4 verweist.

Im Subsystem Halen-Golaten (Halen) befindet sich die Stauanlage Mühleberg, deren Regulierung den Aareabfluss im Raum Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) und der Saanemündung wesentlich beeinflusst. Aufgrund seines Standorts unmittelbar oberwasserseitig des KKM ist die Stauanlage Mühleberg ausserdem ein Bauwerk, dessen allfälliges Versagen Auswirkungen auf den Beurteilungsperimeter Mühleberg (BP Mühleberg) hat.

Unmittelbar oberwasserseitig, resp. gegenüber der Stauanlage Mühleberg befindet sich am linken Wohlenseeufer der Hang "Buttenried". Die geologischen Beurteilungen sagen für diesen Hang eine Rutschung mit einer Jährlichkeit von $5x10^{-4}$ bis $1x10^{-5}$ voraus. Stürzt die Hangmasse in den Wohlensee, läuft die daraus resultierende Impulswelle auf der Staumauer Mühleberg auf, führt zu einem Überschwappen der Staumauer Mühleberg und zu einem flutwellenartigen Abfluss im Unterwasser. Dieses Szenario wurde aufgrund der geologischen Prognosen mit einem HQ100 gerechnet.

- **Rutschung Buttenried:**

Auflaufen einer Impulswelle auf die Staumauer Mühleberg mit Überschwappen des Wohlensees und flutwellenartigem Abfluss im Unterwasser.

Die Stauanlage Mühleberg stellt dasjenige Bauwerk dar, dessen Verhalten im Hochwasserfall die Fliessverhältnisse im Subsystem am stärksten beeinflusst. Können die Hochwasserentlastungsorgane nicht normal betrieben werden, wird im Wohlensee ein grosser zusätzlicher Retentionsraum aktiviert, was die Ganglinie im Unterwasser wesentlich beeinflussen kann. Würde die Staumauer Mühleberg gar brechen, ergäbe sich eine Flutwelle im Unterwasser, die sich allenfalls als Gesamtsystemrelevant erweisen kann. Die Bruchszenarien wurden mit der Ganglinie HQ100 kombiniert, das Ausfallen der Hochwasserentlastung mit HQ100 und HQ10'000.

- **Stauanlage Mühleberg, HW-Entlastung ausser Betrieb (n-n):**

Komplette Verlegung oder Ausfall der Hochwasserentlastungsorgane an der Staumauer Mühleberg, mit Aktivierung zusätzlichen Retentionsraumes im Wohlensee.

- **Stauanlage Mühleberg, partieller Bruch:**

Partieller Bruch der Stauanlage Mühleberg (Gewichtsmauer) mit Flutwellenbildung aus dem Wohlensee Richtung Unterwasser.

- **Stauanlage Mühleberg, vollständiger Bruch:**

Kompletter Bruch der Stauanlage Mühleberg (Gewichtsmauer & Maschinenhaus) mit Flutwellenbildung aus dem Wohlensee Richtung Unterwasser.

Direkt gegenüber des KKM verläuft der relativ steile Hang "Brättele", der zwar verhältnismässig kleine Rutschvolumen aufweist, aufgrund seines Standorts jedoch allenfalls für den Beurteilungsperimeter relevant werden kann. Die geologischen Beurteilungen sagen für diesen Hang eine Rutschung mit einer Jährlichkeit von $1x10^{-3}$ bis $1x10^{-4}$ voraus. Stürzt die Hangmasse in die Aare, wird der Fliessquerschnitt eingeengt, was zu einem Aufstau im Oberwasser und einem Umströmen des Rutschkörpers, allenfalls mit Überströmen der linksufrigen HWS-Dämme, führt. Dieses Szenario wurde aufgrund der möglicherweise relevanten Hangfusserosionen und der geologischen Prognosen mit einem HQ100 in der Aare gerechnet.

- **Rutschung Brättele:**

Rutschung in die Aare gegenüber dem KKM, mit (Teil-)Verlegung des Fliessquerschnitts.

Im Bereich der Saanemündung werden die seitlichen Dämme entlang der Saane bei einem grossen Hochwasser lange bei hoher Wasserspiegellage beansprucht. Eine Breschenbildung an diesem Standort verändert das Subsystemverhalten allerdings nur unwesentlich, da die Fliesswege und -zeiten kaum verändert werden. Aufgrund der Lage der zu untersuchenden Szenarienpunkte im Beurteilungsperimeter Mühleberg wurde der Einfluss einer Breschenbildung im Seitendamm rechtsufrig entlang der Saane dennoch bei einem HQ1'000 in der Saane untersucht.

- **Seitendamm REWAG:**

Bruch des Hochwasserschutzdamms auf Höhe REWAG nach langem Einstau, mit Ausfluss rechtsufrig in die Ebene der Saane-Mündung (mit Standort Beurteilungspunkten).

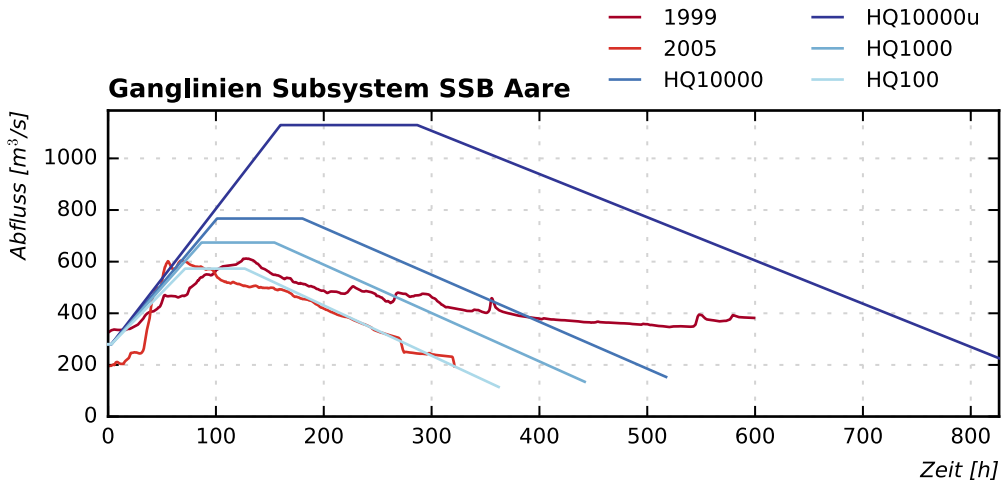
Die verbleibenden inventarisierten Bauwerke (HWS-Dämme, Rutschungen und Brücken) innerhalb des Subsystems SSB wurden gemäss den Ausscheidungskriterien (Detailbericht D, Kap. 4.3) beurteilt und als nicht kritisch, resp. subsystemirrelevant ausgeschieden.

Übersicht der eruierten Szenarien der einzelnen Analysestandorte.

	Analysestandort & Szenario				
Resultatblatt Nr.	Ereignis (Hydrologie)	Einwirkung	Versagensprozess	Kilometrierung	Schlüsselstelle
I	**Rutschung Buttenried**				
I.1	HQ100 Aare	spontane Rutschung	Rutschung	Aare, km 157.300	nein
II	**Stauanlage Mühleberg**				
II.1	HQ100 Aare HQ10'000 Aare	HW-Entlastung ausser Betrieb (n-n)	keine / Umströmen	Aare, km 157.000	nein
II.2	HQ100 Aare	Partieller Bruch (Gewichtsmauer)	plötzlicher Kollaps	Aare, km 157.000	ja
II.3	HQ100 Aare	Vollständiger Bruch (Gewichtsmauer & Maschinenhaus)	plötzlicher Kollaps	Aare, km 157.000	ja
III	**Rutschung Brättele**				
III.1	HQ1'000 Aare	spontane Rutschung	Rutschung	Aare, km 155.285	nein
IV	**Seitendamm REWAG**				
IV.1	HQ1'000 Saane	Überströmen	Breschenbildung / Ausbruch rechtsufrig	Saane, km 001.000	nein

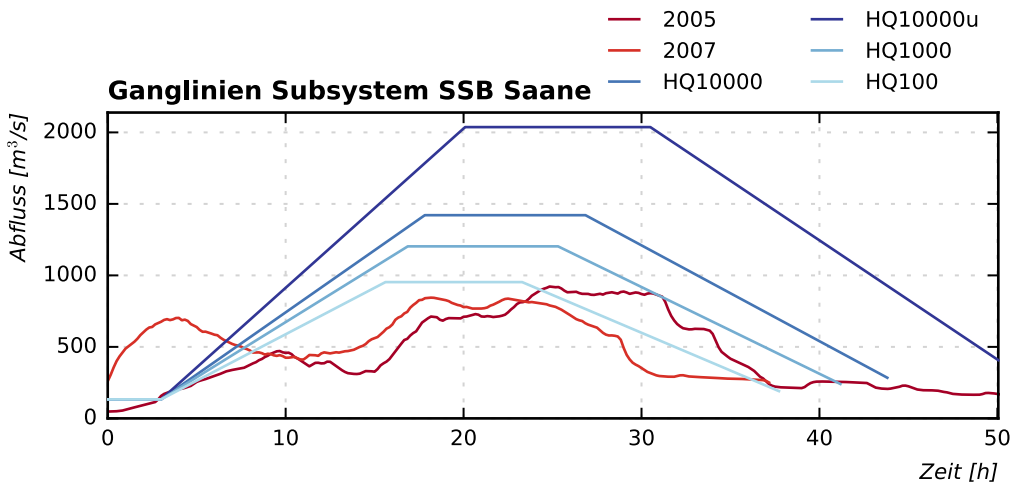
3. Hydrologische Szenarien – Synthetische Ganglinien

Messstation: Aare, Bern Schönau (km 185.970)



Vergleich der synthetischen Ganglinien mit beobachteten Hochwasserereignissen für die Aare im Subsystem SSB.

Messstation: Saane, Laupen (km 009.440)



Vergleich der synthetischen Ganglinien mit beobachteten Hochwasserereignissen für die Saane im Subsystem SSB.

4. Resultate der Analysestandorte

Im Folgenden findet sich für jeden Analysestandort mit einem kritischen Szenario (vgl. Übersichtstabelle Kap. 2) ein Resultatblatt. Das Resultatblatt beinhaltet einen detaillierten Szenarienbeschrieb, die PQ-Beziehung für die Umsetzung im hydraulischen Modell sowie die Grundlagen (Überflutungskarten, Ganglinienvergleich zwischen Nulllauf und Szenario inkl. Ausscheidungskriterien) und den kommentierten Entscheid zur Ausscheidung der Schlüsselstelle.

Die hier vorgestellten Resultatblätter beziehen sich ausschliesslich auf die Gefährdung durch Überflutung (hydraulische Belastung), wie sie in Kap. 7.1 des EXAR-Hauptberichts bzw. im Detailbericht E beschrieben werden. Bei der Gefährdungsanalyse in den Beurteilungsperimeter wird im EXAR-Hauptbericht bzw. im Detailbericht F zusätzlich auf Gefährdung durch Terrain- und Gerinneveränderungen infolge von fluvial bedingten morphologischen Prozessen eingegangen. Weiter sind Aufstauhöhen infolge möglicher Schwemmholzverklausung bei den Beurteilungsperimetern in den Resultatmappen 3 abgeschätzt und dokumentiert.

I. Rutschung Buttenried

Lokalität	Szenarien
Aare, km 157.300	I.1 Rutschung

I.1 Rutschung

Auflaufen einer Impulswelle auf die Staumauer Mühleberg mit Überschwappen des Wohlensees und flutwellenartigem Abfluss im Unterwasser.

Szenarienbeschrieb

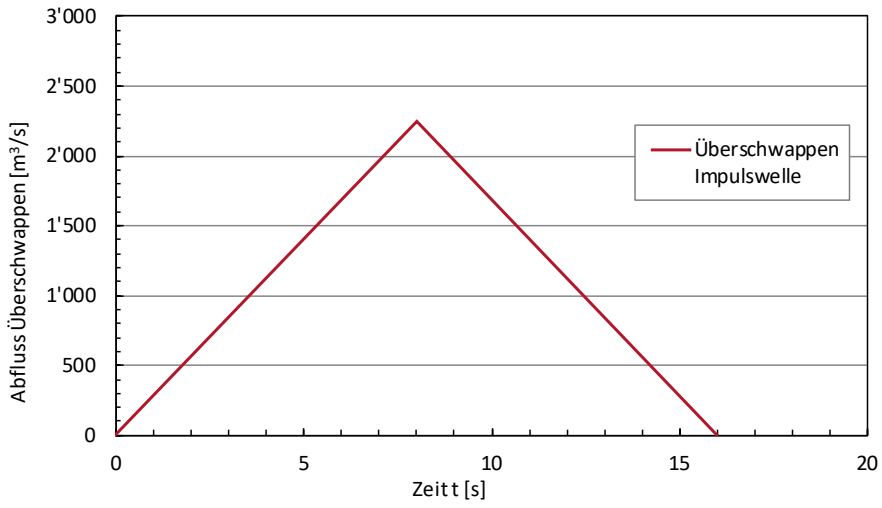
Eine spontane Rutschung grossen Ausmasses kann beim Sturz in den Wohlensee eine Impulswelle auslösen, die sich auf dem Wohlensee ausbreitet und im Bereich der Staumauer Mühleberg zu einem Überschwappen führt. Das überströmende Wasser pflanzt sich dann im Unterwasser in Form einer Welle fort, die den Abfluss am Ende des Subsystems, resp. am Beurteilungsperimeter Mühleberg beeinflussen könnte.

Hang Buttenried, Blick von der Staumauer Mühleberg Richtung Oberwasser. Quelle: IUB Engineering AG, Begehung vom 05. April 2017.

Untersuchte hydrologische Szenarien	Szenario-ID
HQ100 Aare	SSB_HQ100kAAR-AAR-157300-SR-PF

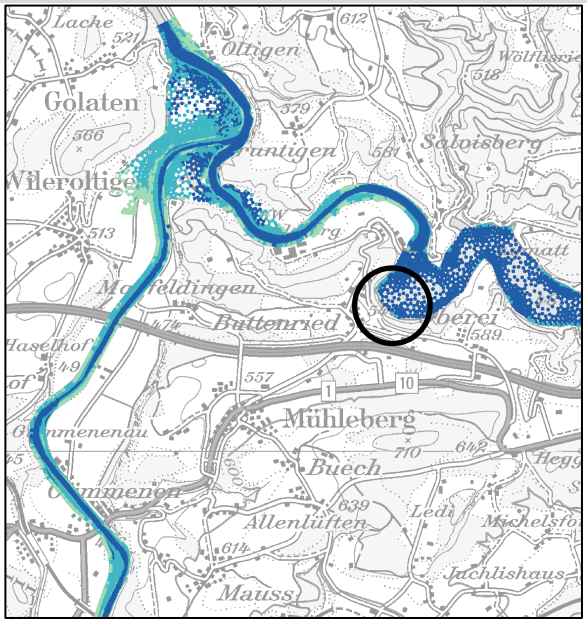
PQ-Beziehung (Normalbetrieb und Versagen)

Im Falle der Rutschung Buttenried wurde keine PQ-Beziehung erstellt, sondern an der Staumauer Mühleberg eine Inputganglinie ins Modell eingespiesen, die das Überschwappen an der Mauer abbildet. Dabei wurde der maximale Abfluss aus dem berechneten Überschwappvolumen und der Überschwappzeit abgeleitet.
Aufgrund der sehr kurzen Ganglinie aus dem Überschwappen musste die zeitliche Auflösung der Resultate aus der hydraulischen Modellierung von 30 min auf 2 sek angepasst werden. Für dieses Szenario wurde deshalb nur eine Gangliniendauer von 5 h modelliert.

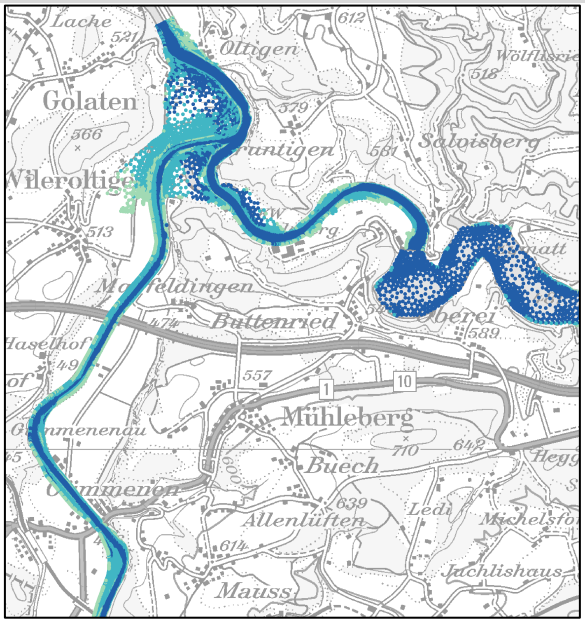


Input-Ganglinie für das Überschwappen einer Impulswelle aus der Rutschung Buttenried.

Maximale Überflutungsfläche

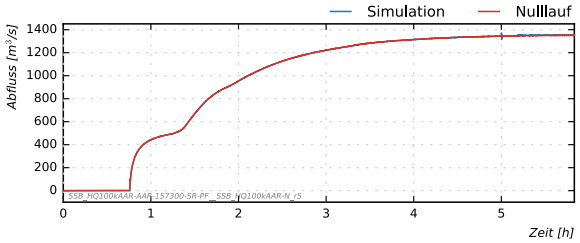


Fliesstiefenkarte für Nulllauf HQ100 Aare.



Fliesstiefenkarte für Szenariolauf HQ100 Aare mit Überschwappen einer Impulswelle aus der Rutschung Buttenried.

Ganglinienvergleich Nulllauf mit Szenario am Transferpunkt Golaten (Aare, km 151.810)



HQ100 Aare.

Szenario	HQ	Versagens-auslösung	Differenz Abflussspitze [%]	Differenz Volumen [%]	Entscheid Schlüsselstelle
Rutschung	100 Aare	bei max. Wasserstand im Wohlensee	1.4	0.1	NEIN

Fazit

Die Flutwelle aus dem Überschwappen mit einem Spitzenabfluss von über 2'000 m³/s flacht sehr schnell ab. Am unteren Ende des Subsystems ist der erhöhte Spitzenabfluss im Vergleich zum Nulllauf zwar noch sichtbar, mit 1.4 % jedoch deutlich unter dem Schwellenwert, um als Schlüsselstelle klassiert zu werden. Da von diesem Analysestandort potenziell eine direkte Gefährdung für den Beurteilungsperimeter Mühleberg ausgeht, wurde er im Rahmen der Gefährdungsanalyse berücksichtigt und detaillierter untersucht.

II. Stauanlage Mühleberg

Lokalität	Szenarien
Aare, km 157.000	II.1 HW-Entlastung ausser Betrieb (n-n) II.2 Partieller Sperrenbruch II.3 Vollständiger Bruch

II.1 HW-Entlastung ausser Betrieb (n-n)

Komplette Verlegung oder Ausfall der Hochwasserentlastungsorgane an der Staumauer Mühleberg, mit Aktivierung zusätzlichen Retentionsraumes im Wohlensee.

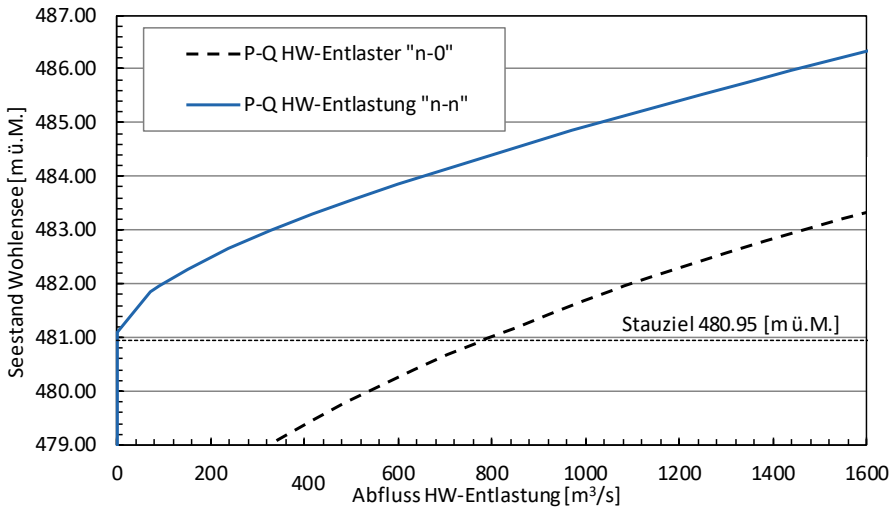
Szenarienbeschrieb

Aufgrund von Betriebs-/Entscheidungsfehlern, technischen Fehlern oder hohem Schwemmholzaufkommen wird die Hochwasserentlastung der Staumauer stark beeinträchtigt. Es wird davon ausgegangen, dass sämtliche Wehröffnungen ausfallen und der gesamte Abfluss durch Über- und Umströmen der Stauanlage den Wohlensee passiert. Der so resultierende Überfall über die komplett geschlossene Mauer wurde als Randbedingung mittels neuer errechneter PQ-Beziehung an das numerische Modell weitergegeben.

Stauanlage Mühleberg, Mühleberg. Blick aus dem UW. Quelle: IUB Engineering AG, Begehung vom 05. April 2017.

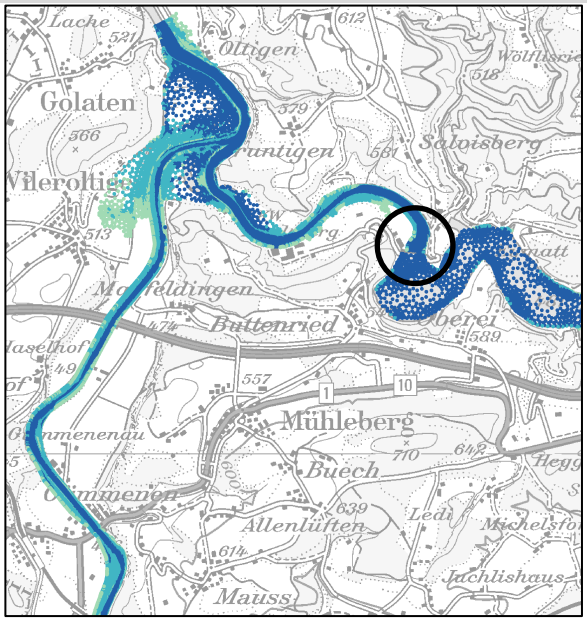
Untersuchte hydrologische Szenarien	Szenario-ID
HQ10'000 Aare	SSB_HQ10000kAAR-AAR-157000-SW-Pnn

PQ-Beziehung (Normalbetrieb und Versagen)

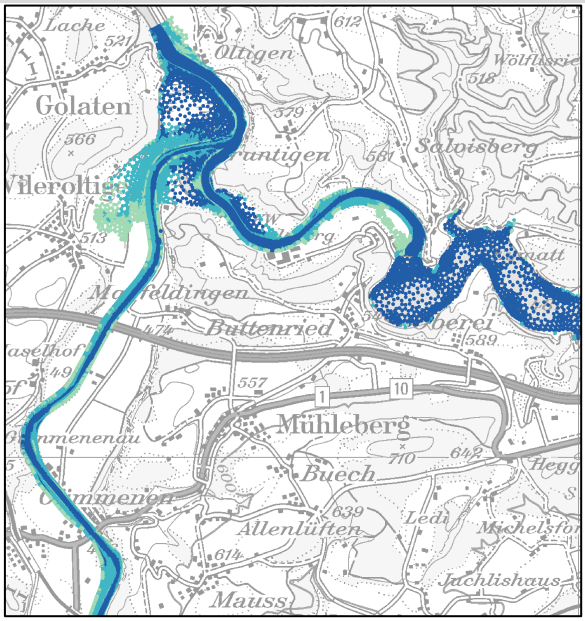


P-Q-Beziehung der Staumauer Mühleberg, mit n = 6 offenen (schwarz gestrichelt, Normalbetrieb) und komplett geschlossenen Wehrfeldern n-n (blau, bei Versagen der Regulierorgane) und Grundablass.

Maximale Überflutungsfläche

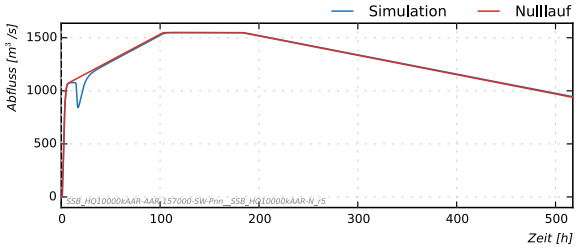


Fliesstiefenkarte für Nulllauf HQ10'000 Aare (Normalbetrieb an der Stauanlage Mühleberg).



Fliesstiefenkarte für Szenariolauf HQ10'000 Aare (n-n-Bedingungen an der Stauanlage Mühleberg).

Ganglinienvergleich Nulllauf mit Szenario am Transferpunkt Golaten (Aare, km 151.810)



HQ10'000 Aare.

Szenario	HQ	Versagens-auslösung	Differenz Abflussspitze [%]	Differenz Volumen [%]	Entscheid Schlüsselstelle
Breschenbildung / Ausbruch linksufrig	10'000 Aare	von Beginn	0.0	-0.2	NEIN

Fazit

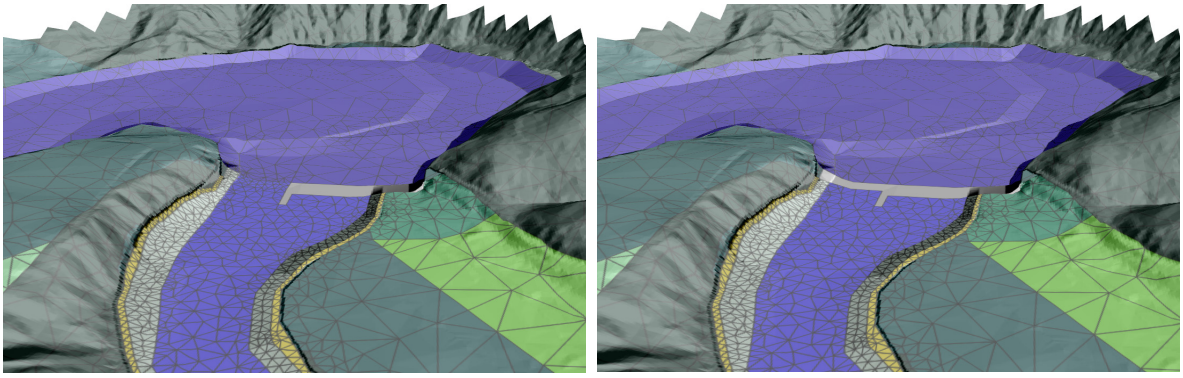
Der Ausfall sämtlicher Wehröffnungen am Wasserkraftwerk Mühleberg führt zu einem Aufstau im Wohlensee mit Aktivierung zusätzlicher Retentionsräume. Das zusätzlich gespeicherte Wasservolumen ist im Vergleich zum Volumen der gesamten Inputganglinie jedoch marginal, weshalb dieses Szenario nicht als Schlüsselszenario klassiert wurde.

II.2 Partieller Bruch (Gewichtsmauer)

Bruch der Gewichtsmauer Mühleberg (Wehrkörper) mit Flutwellenbildung aus dem Wohlensee Richtung Unterwasser.

Szenarienbeschrieb

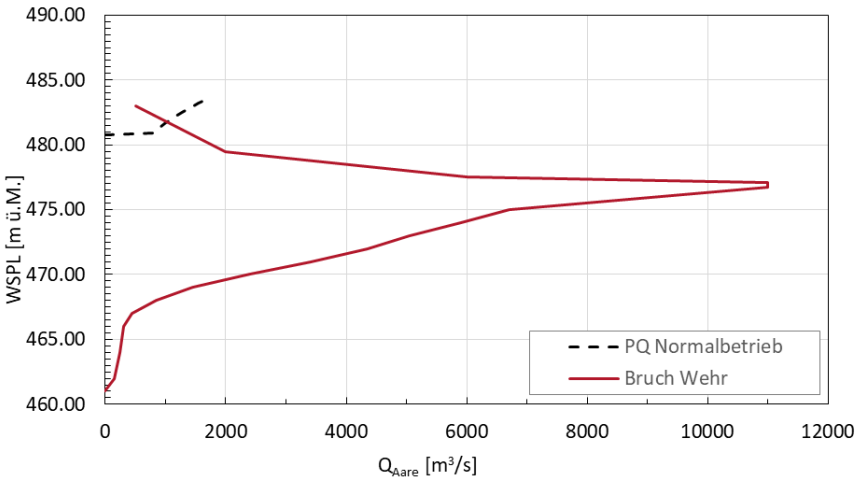
Im vorliegenden Szenario wird angenommen, dass die Gewichtsmauer der Stauanlage Mühleberg bricht und einen Teil des aufgestauten Fliessquerschnitts plötzlich freigibt (Breite Mauerkörper rund 75 m). Der Wohlensee fliesst aus, was zu einer Flutwelle im Unterwasser führt. Für die Abflussganglinie an der Stauanlage Mühleberg wurde zuerst mittels Flutwellenberechnung eine Pegel-Abfluss-Beziehung hergeleitet und diese anschliessend in das Modell des Subsystems für die Schlüsselstellenanalyse eingefügt.



Berechnungsgitter für die Flutwellenmodellierung (links) und die Modellierung mit PQ-Beziehung (rechts) Blick vom Unterwasser auf die Stauanlage Mühleberg mit dem Wohlensee im Hintergrund.

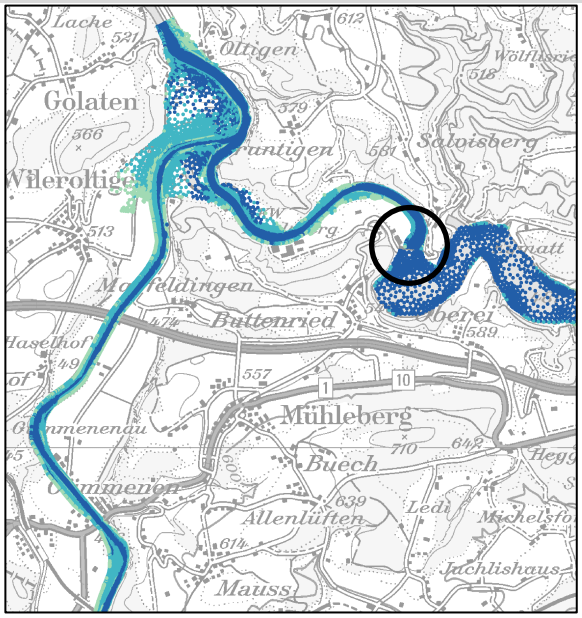
Untersuchte hydrologische Szenarien	***Szenario-ID***
HQ100 Aare	SSB_HQ100kAAR-AAR-157000-SW-PB

PQ-Beziehung (Normalbetrieb und Versagen)

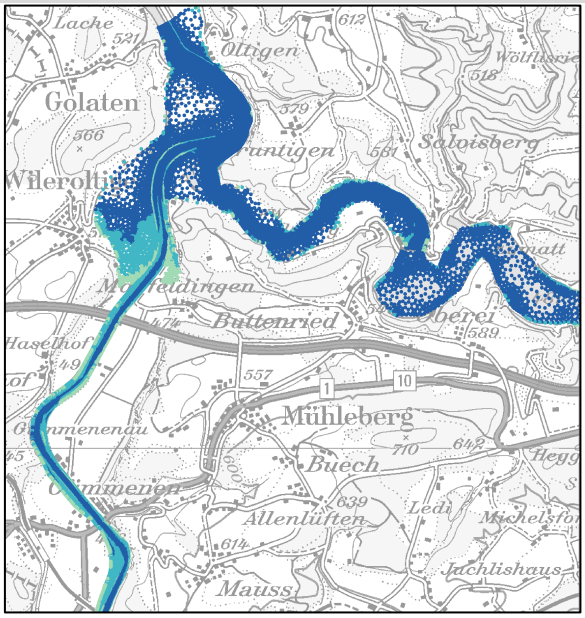


P-Q-Beziehung der Stauanlage Mühlebrg bei Normalbetrieb (schwarz gestrichelt) sowie beim partiellen Bruch (Bruch Gewichtsmauer – rot).

Maximale Überflutungsfläche

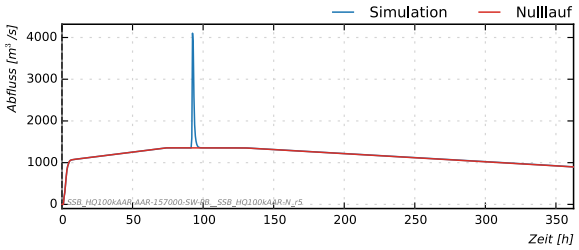


Fliesstiefenkarte für Nulllauf HQ100 Aare (Normalbetrieb an der Stauanlage Mühleberg).



Fliesstiefenkarte für Szenariolauf HQ100 Aare (partieller Bruch der Stauanlage Mühleberg).

Ganglinienvergleich Nulllauf mit Szenario am Transferpunkt Golaten (Aare, km 151.810)



HQ100 Aare.

Szenario	HQ	Versagens-auslösung	Differenz Abflussspitze [%]	Differenz Volumen [%]	Entscheid Schlüsselstelle
Partieller Dammbruch	100 Aare	bei max. Wasserstand im Wohlensee	202.8	1.1	JA

Fazit

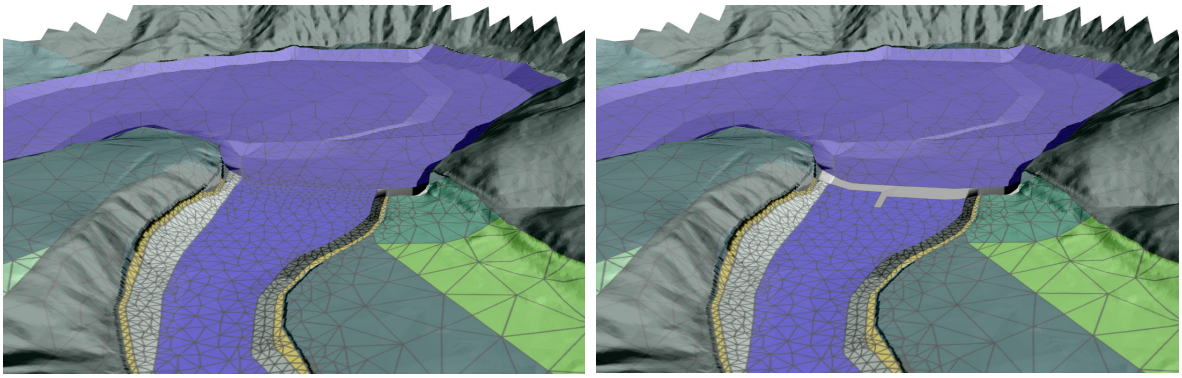
Der Bruch der Gewichtsmauer des Wasserkraftwerks Mühleberg führt zu einer massiven Flutwelle, welche auch am Ende des Subsystems am Transferpunkt Golaten noch deutlich spürbar ist. Aufgrund der grossen Differenz im Spitzenabfluss wird das Szenario partieller Dammbruch als Schlüsselszenario klassiert und in der Gesamtsystemanalyse vertieft untersucht.

II.3 Vollständiger Bruch (Gewichtsmauer & Maschinenhaus)

Bruch der gesamten Stauanlage Mühleberg (Gewichtsmauer & Maschinenhaus) mit Flutwellenbildung aus dem Wohlensee Richtung Unterwasser.

Szenarienbeschrieb

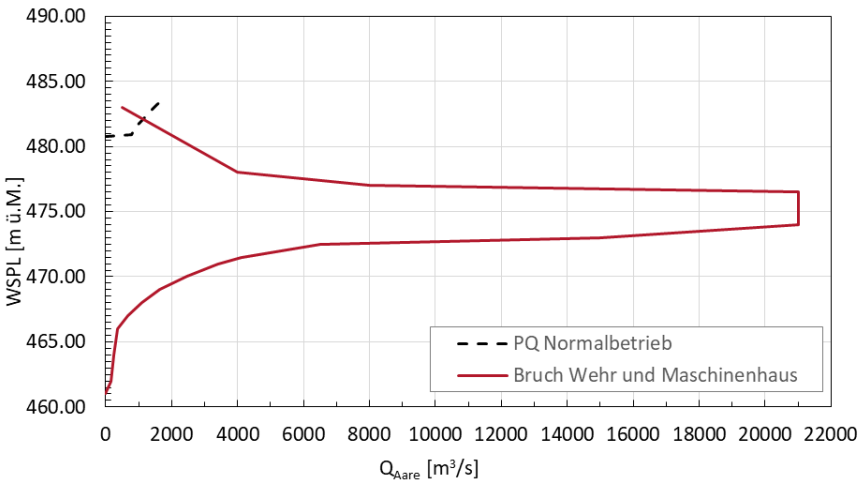
Im vorliegenden Szenario wird angenommen, dass zusätzlich zur Gewichtsmauer der Stauanlage Mühleberg auch das Maschinenhaus bricht und der gesamte aufgestaute Fliessquerschnitt plötzlich freigegeben wird (Breite Staumauer & Maschinenhaus rund 175 m). Der Wohlensee fliesst aus, was zu einer Flutwelle im Unterwasser führt. Für die Abflussganglinie an der Stauanlage Mühleberg wurde zuerst mittels Flutwellenberechnung eine Pegel-Abfluss-Beziehung hergeleitet und diese anschliessend in das Modell des Subsystems für die Schlüsselstellenanalyse eingefügt.



Berechnungsgitter für die Flutwellenmodellierung (links) und die Modellierung mit PQ-Beziehung (rechts) Blick vom Unterwasser auf die Stauanlage Mühleberg mit dem Wohlensee im Hintergrund.

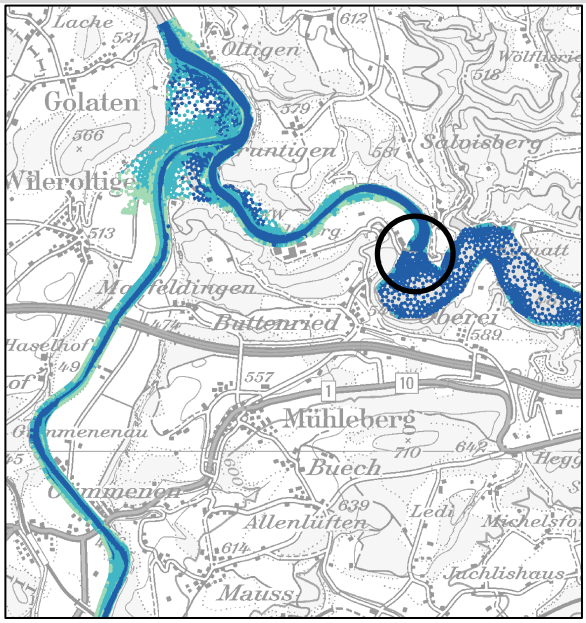
Untersuchte hydrologische Szenarien	***Szenario-ID***
HQ100 Aare	SSB_HQ100kAAR-AAR-157000-SW-SK-PB

PQ-Beziehung (Normalbetrieb und Versagen)

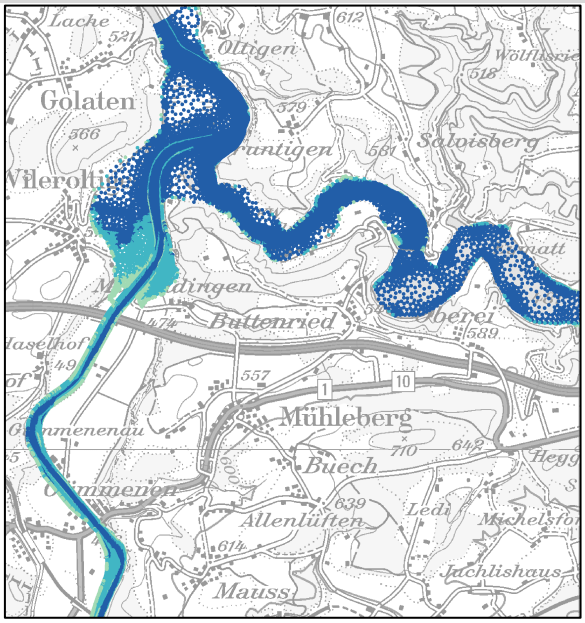


P-Q-Beziehung der Stauanlage Mühlebrg bei Normalbetrieb (schwarz gestrichelt) sowie beim kompletten Bruch (Bruch Gewichtsmauer und Maschinenhaus – rot).

Maximale Überflutungsfläche

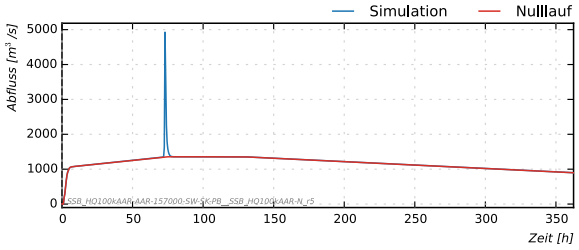


Fliesstiefenkarte für Nulllauf HQ100 Aare (Normalbetrieb an der Stauanlage Mühleberg).



Fliesstiefenkarte für Szenariolauf HQ100 Aare (partieller Bruch der Stauanlage Mühleberg).

Ganglinienvergleich Nulllauf mit Szenario am Transferpunkt Golaten (Aare, km 151.810)



HQ100 Aare.

Szenario	HQ	Versagens-auslösung	Differenz Abflussspitze [%]	Differenz Volumen [%]	Entscheid Schlüsselstelle
Partieller Dammbruch	100 Aare	bei max. Wasserstand im Wohlensee	263.6	1.1	JA

Fazit

Der komplette Bruch der Stauanlage Mühleberg führt zu einer massiven Flutwelle, welche auch am Ende des Subsystems am Transferpunkt Golaten noch deutlich spürbar ist. Der Vergleich mit dem Szenario partieller Dammbruch zeigt jedoch, dass der Unterschied zwischen den beiden Szenarien am Ende des Subsystems nicht mehr so gross ist wie direkt im Unterwasser der Stauanlage. Aufgrund der grossen Differenz im Spitzenabfluss wird das Szenario kompletter Dammbruch als Schlüsselszenario klassiert und in der Gesamtsystemanalyse vertieft untersucht.

III. Rutschung Brättele

Lokalität	Szenarien
Aare, km 155.285	III.1 Rutschung

III.1 Rutschung

Rutschung Brättele in die Aare gegenüber dem KKM, mit (Teil-)Verlegung des Fliessquerschnitts.

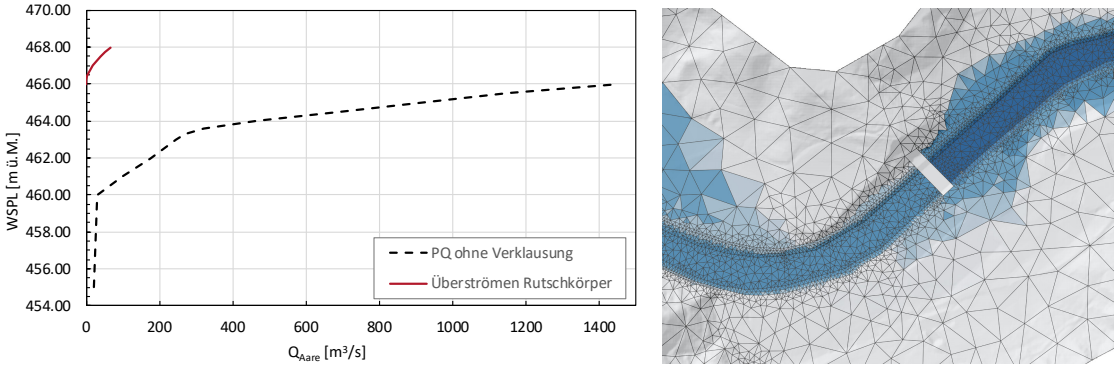
Szenarienbeschrieb

Eine spontane Rutschung am Gegenhang des KKM engt den Fliessquerschnitt der Aare auf Höhe KKM ein und führt zu einem Aufstau im Oberwasser mit anschliessendem Umströmen des Rutschkörpers und allenfalls mit einem Überströmen des linksufrigen Schutzdammes entlang der Aare. Aufgrund der geologischen Beurteilungen wurde das Szenario mit einem HQ1'000 gerechnet.

Rutschungsstandort Brättele, Mühleberg. Blick in Fliessrichtung (links) und Hangansicht vom gegenüberliegenden Aareufer (rechts). Quelle: IUB Engineering AG, Begehung vom 10. April 2017.

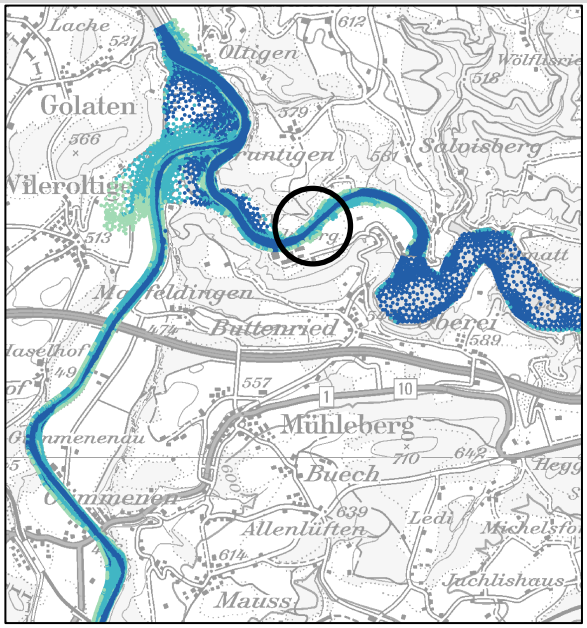
Untersuchte hydrologische Szenarien	Szenario-ID
HQ1'000 Aare	SSB_HQ1000kAAR-AAR-155285-SR-PR

PQ-Beziehung (Normalbetrieb und Versagen)

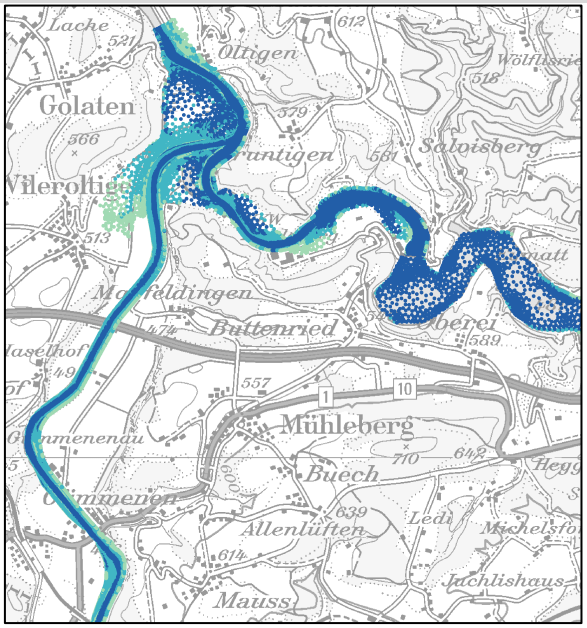


PQ-Beziehung am Standort der Rutschung Brättele. Freier Fliessquerschnitt über die gesamte Flussbreite (schwarz gestrichelt, Normalzustand) und Abflussanteil über die gesamte Flussbreite durch Überströmen des Rutschkörpers (rot, nach Rutschung).

Maximale Überflutungsfläche

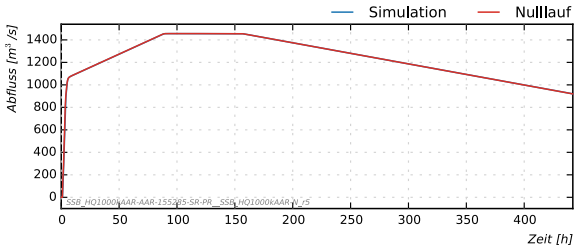


Fliesstiefenkarte für Nulllauf HQ1'000 Aare.



Fliesstiefenkarte für Szenariolauf HQ1'000 Aare mit Rutschung Brättele.

Ganglinienvergleich Nulllauf mit Szenario am Transferpunkt Golaten (Aare, km 151.810)



HQ1'000 Aare.

Szenario	HQ	Versagens-auslösung	Differenz Abflussspitze [%]	Differenz Volumen [%]	Entscheid Schlüsselstelle
Rutschung	1'000 Aare	von Beginn	0.0	0.0	NEIN

Fazit

Der Effekt der Rutschung Brättele besteht primär aus einer Umlenkung des Wassers in direkter Umgebung des Rutschkörpers. Der durch den Rutschkörper verursachte Rückstau in der Aare hat im Vergleich zur Abflussganglinie nur ein sehr geringes Volumen. Deshalb ist am Ende des Subsystems keine Differenz zwischen Nulllauf und Versagenslauf sichtbar, weshalb die Rutschung Brättele nicht als Schlüsselstelle im Gesamtsystem bezeichnet werden kann.

Da von diesem Analysestandort potenziell eine direkte Gefährdung für den Beurteilungsperimeter Mühleberg ausgeht, wurde er im Rahmen der Gefährdungsanalyse berücksichtigt und detaillierter untersucht.

IV. Seitendamm REWAG

Lokalität	Szenarien
Saane, km 001.000	IV.1 Breschenbildung / Ausbruch rechtsufrig

IV.1 Breschenbildung / Ausbruch rechtsufrig

Bei einem HQ1'000 in der Saane wird der Hochwasserschutzdamm auf Höhe REWAG durch den langen Einstau instabil und anschliessend bis zum Dammfuss auf einer Länge von 45 m erodiert.

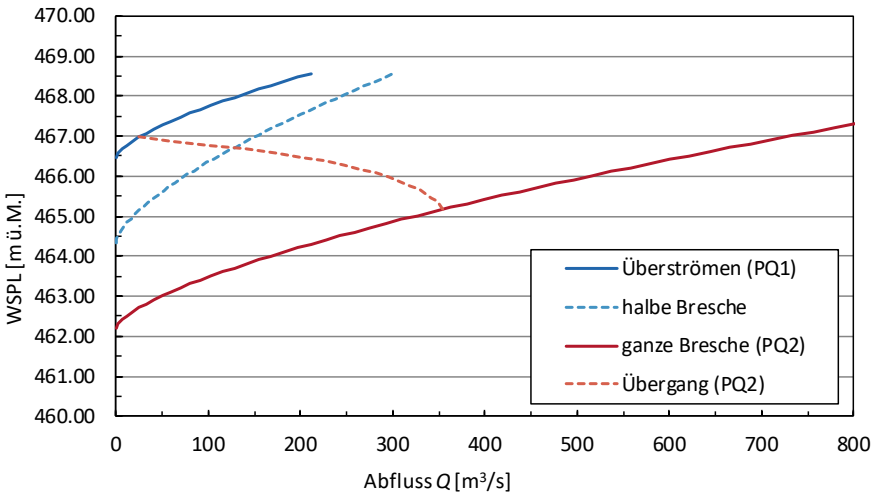
Szenarienbeschrieb

Bei grossen Hochwasserabflüssen in der Saane kommt es zu einem Aufstau im Oberwasser der Saane-Mündung, wobei die Hochwasserschutzdämme dort lange bei hoher Wasserspiegellage beansprucht werden. Bildet sich im Bereich REWAG aufgrund der langanhaltenden Belastung mit Volleinstau des HWS-Dammes eine Bresche, erfolgt eine Entlastung in die rechtsufrige Fläche und damit in einen Bereich mit einem zu beurteilenden Szenariopunkt des Beurteilungsperimeters Mühleberg. Im vorliegenden Fall wird davon ausgegangen, dass der HWS-Damm erodiert wird und sich auf einer Länge von 45 m eine Bresche bis zum Dammfuss luftseitig bildet. Die maximale seitliche Entlastung beträgt so bis zu ca. 350 m^3/s. Der Zeitpunkt der Breschenbildung wurde auf 17 h nach Beginn des Spitzenabflusses festgelegt, was den für das Versagen benötigten langanhaltenden Volleinstau widerspiegelt.

HWS-Damm und Dammweg rechtsufrig im Winterkleid, im Bereich REWAG oberwasserseitig der Saane-Mündung, Blick in Fliessrichtung. Quelle: IUB Engineering AG, Begehung vom 01. März 2018.

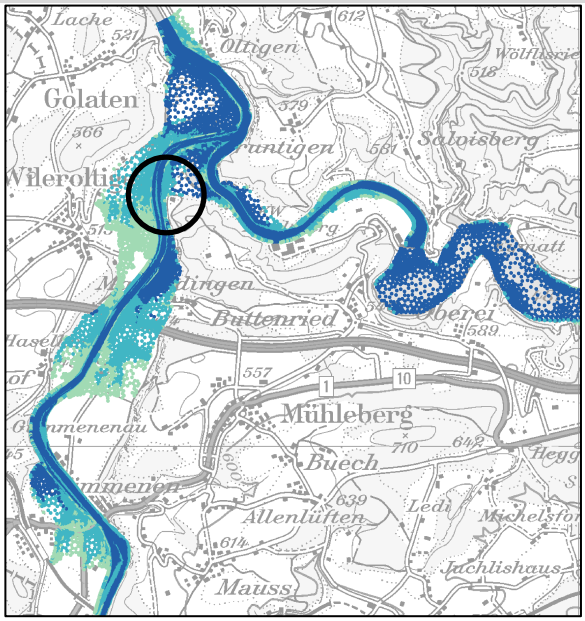
Untersuchte hydrologische Szenarien	Szenario-ID
HQ1'000 Saane	SSB_HQ1000kSAA-SAA-001000-SD-PG

PQ-Beziehung (Normalbetrieb und Versagen)

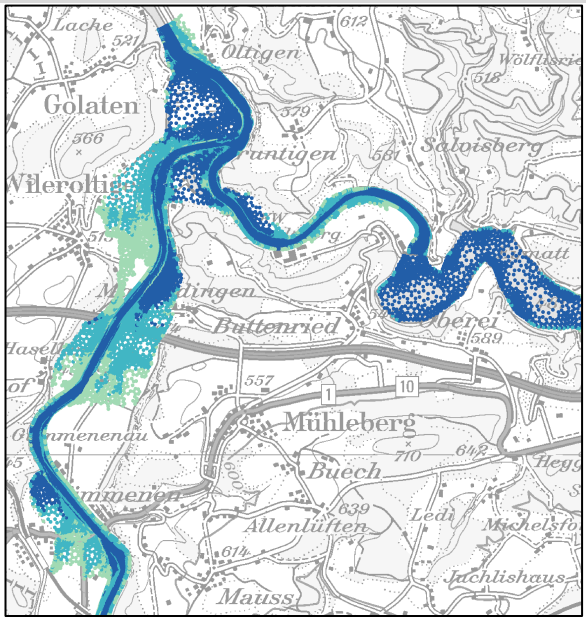


PQ-Beziehung des Seitendammes REWAG bei intaktem Dammkörper (Überströmen, blau) und nach Breschenbildung (Breschenlänge = Flussbreite, Abtiefung bis auf Terrainkote luftseitig, rot).

Maximale Überflutungsfläche

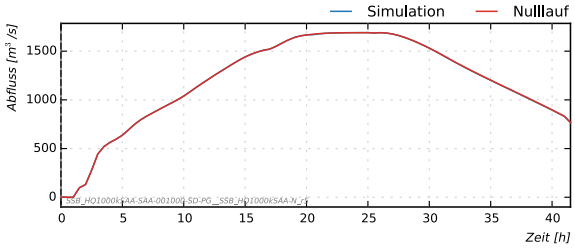


Fliesstiefenkarte für Nulllauf HQ1'000 Saane.



Fliesstiefenkarte für Szenariolauf HQ1'000 Saane mit Breschenbildung im HWS-Damm REWAG und Entlastung rechtsufrig.

Ganglinienvergleich Nulllauf mit Szenario am Transferpunkt Golaten (Aare, km 151.810)



HQ1'000 Saane.

Szenario	HQ	Versagens-auslösung	Differenz Abflussspitze [%]	Differenz Volumen [%]	Entscheid Schlüsselstelle
Breschenbildung / Ausbruch rechtsufrig	1'000 Saane	17h nach Beginn Spitzenabfluss	0.0	-0.1	NEIN

Fazit

Der Einfluss der Bresche auf das Gesamtsystemverhalten bleibt gering, weil der Breschenstandort unmittelbar vor der Saane-Mündung liegt und damit die Fliesswege und -zeiten zwischen Nulllauf und Szenariolauf praktisch unverändert bleiben. Der Bereich zwischen der Saane und der Aare ist bereits bei einem rein hydrologischen Szenario HQ1'000 überflutet, womit auch der durch die Bresche erschlossene Retentionsraum bereits gefüllt ist. Aus diesem Grund kann die Bresche REWAG nicht als Schlüsselstelle bezeichnet werden.

Da von diesem Analysestandort potenziell eine direkte Gefährdung für den Beurteilungsperimeter Mühleberg (Szenariopunkt in der Ebene zwischen Saane und Aare) ausgeht, wurde er im Rahmen der Gefährdungsanalyse berücksichtigt und detaillierter untersucht.